

热固性复合材料结构固化回弹变形研究进展*

Study Progress of Curing-Induced Springback for Thermosetting Composites

上海飞机制造有限公司 魏冉 贾丽杰 晏冬秀 孙晶晶

[摘要] 热压罐成型是目前热固性复合材料构件的主要成型工艺之一。复合材料构件在热压罐成型过程中产生的变形是影响其成型精度的主要原因。制件发生固化变形的形式主要有翘曲和回弹两种形式。本文着重回顾复合材料固化成型后回弹变形现象的产生及其影响因素的试验研究,继而展开针对回弹现象的模拟预测方法进行综述与分析。

关键词: 热固性复合材料 回弹 影响因素 仿真

[ABSTRACT] Autoclave process for thermosetting composites is among the most commonly used approach, which could cause serious shape distortion and springback phenomena due to the curing procedure. Experimental research on the origin and influencing factors for the springback is reviewed, followed by the retrospective of the simulation-based work on the prediction of springback phenomena.

Keywords: Thermosetting composites Springback phenomena Influencing factor Simulation

热固性树脂基复合材料在热压罐成型过程中,经历高温固化成型及冷却后,由于材料的热胀冷缩、基体树脂的化学反应收缩以及复合材料的成型模具与复合材料在热膨胀系数上的显著差异等,使其在室温下的自由形状与预期的理想形状之间会产生一定程度的不一致,通常将这种不一致状态称为构件的固化变形。

制件固化变形形式分为翘曲和回弹,翘曲是指结构在平直部分的弯曲或扭转变形,主要是由于结构内应力分布不均匀引起的;回弹是指结构在拐角处变形所导致的夹角变化,主要是由复合材料本身的各向异性引起的。回弹将给制件间的装配带来容差超差等问题,如图1所示,翼梁缘条回弹使其外形偏离了设计要求而导致蒙皮与翼梁间螺栓连接装配孔错位,若对装配件进行强制装配将会引起残余应力、密封不好等问题,这样就会降低结构的强度和疲劳寿命,甚至造成制件报废。因此

复合材料层合结构固化变形控制是复合材料结构设计中的一关键技术。

回弹的产生为之后制件间的装配带来了不小的困难,人们通常通过调整模具型面以补偿制件回弹。模具的调整量值通常根据以往的经验或反复试模,然而该方法大大增加了制件的成本预算和研制周期,严重制约复合材料在复杂装配关系结构中的应用。因此,探寻影响复合材料回弹变形影响因素并建立回弹预测方法,成为复合材料制造工艺研究的方向之一。

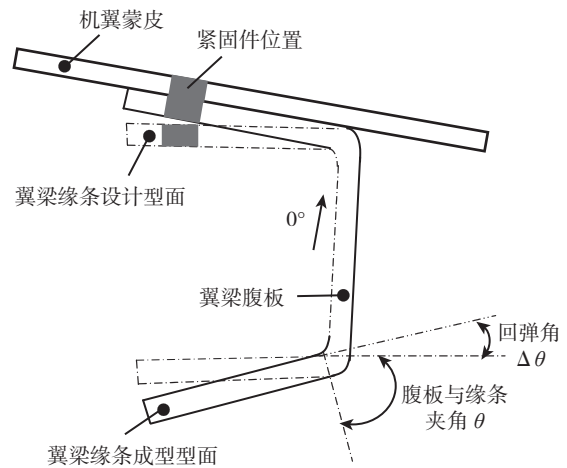


图1 回弹对装配带来的影响

Fig.1 Influence of springback on part assembly

1 回弹变形试验研究

影响固化变形的因素众多,大致可分为内因和外因两类。内因包括材料特性、纤维体积分数、铺层取向及结构形式、厚度等;外因包括制件固化制度、模具对复材制件的影响等。这些影响变形的因素在构件内经应力梯度和温度梯度耦合作用导致固化时的内应力积聚,一部分应力在工件中以残余应力的形式长久存在,另一部分应力在产品脱模后时释放,这两部分应力存在的形式共同导致回弹变形。

1.1 内部因素

1.1.1 材料特性

从微观上来看,复合材料由纤维和树脂基体两相构

* 国家国际科技合作专项(2013DFG52420)资助。

成,这两组分之间热学性能的差异是产生固化变形的原因之一,由于基体的热膨胀系数与纤维的热膨胀系数不同(一般相差一个或者更多数量级),层板中纤维的热变形远远小于基体的变形量,材料内部随即产生应力用以平衡各组分间的变形差异。这些材料内应力将在构件脱模后释放而导致构件翘曲或回弹。

1.1.1.2 纤维体积分数

纤维体积分数的变化影响材料的弹性性能和热性能。纤维体积分数会影响固化过程中的放热温度和固化度。纤维体积分数降低意味着复合材料单位质量固化放热量和层压板中放热温度峰值的增加。这些由温度梯度而导致的应力梯度会导致结构内应力,进而导致工件变形。Radford^[1]认为纤维体积分数在复合材料制件中的分布梯度是导致扭曲的原因。封装后的复合材料制件其贴袋面由于吸胶层的存在形成了贫胶区域,而贴模面则的树脂含量则相对较多,固化过程中树脂含量密集的区域会产生更多的变形收缩,因而产生了回弹。Yang^[2]在复材织物固化过程中也发现了这一影响因素,他在文献中还建立了一种层板纤维体积分数预测方法,但在试验中发现随着层板厚度的增加(纤维体积分数梯度增大),扭曲变形却逐渐变小。

1.1.1.3 铺层取向

铺层取向对固化变形的影响主要由纤维及树脂性能差异导致。对于层合结构而言,不但其单层内存在纤维和基体之间的热应力,层与层之间也存在热应力。大多数复合材料层压板是由多层具有纤维主向的单向带预浸料经热压工艺制成,故层压板在每一层单向带上显示出的热学性能是不同的。对于[0/90]正交铺层而言0°铺层沿X方向发生明显膨胀,而90°铺层膨胀方向却是沿Y方向,两铺层作为一个整体在进行应变协调的同时,厚度方向上产生了附加弯矩导致层板呈现马鞍状。当不同方向单向带预浸料铺叠为层压板固化时,层与层间的变形不一致,但结构是连续整体的结构,因此各层间的变形经协调后会产生扭转力矩或弯矩,由此导致结构变形。

Patterson^[3]和Stephen^[4]均在自己的研究中指出铺层铺设方式(正交铺层、角铺设铺层、准各向同性铺层)对于回弹角的影响几乎可以忽略。两者均认为90°铺层所引起的回弹几乎为零,但对于0°铺层所引起的回弹程度上存在着分歧。

Stephan认为0°铺层所引起的回弹角最大而Patterson等^[3,5-6]认为0°铺层的回弹要小于各个方向铺层都存在的复材制件。Patterson在试验中通过对调0°和90°在对称铺层中的位置来研究铺层顺序对回弹的影响,研究表明改变铺层顺序基本不会引起回弹角发生变化。

1.1.1.4 几何结构

对于对称铺层的复合材料层合平板,由于面内应力在厚度方向得以平衡,若工艺参数合理,在模具的影响因素忽略的情况下,从理论上分析,该层压板应该不产生翘曲变形。工型长桁由于截面“工”型关于其几何中心对称,故采用腹板或者缘条对称方式铺层固化后也不产生明显回弹(因为铺帖时不能保证腹板和缘条同时对称,所以部分非对称的铺层会导致翘曲变形,但变形量很小)。而对于几何为曲面的结构(如L型),即使采用对称铺层,由于其结构径向受力以树脂为主,周向受力以纤维结构为主,两者热膨胀系数差异较大,即使采用对称铺层也会产生固化回弹变形,其在固化后开角 ϕ_1 小于原开角 ϕ_2 ,如图2所示。Fernlund等^[6]对不同几何构型(C型和L型结构)对回弹角的影响进行了研究,研究认为C型结构的回弹变形比L型结构的变形更大,原因在于C型结构在模具成型中存在着的“几何自锁”现象增大了回弹角。制件R角对于回弹角度的影响研究目前不尽相同, Kim等^[7]认为R角减小制件固化后回弹角度也相应变小;而Patterson^[3]和Wiersma^[8]则认为R角的大小不影响回弹变形。

1.1.1.5 厚度

厚度对结构固化变形的影响是材料特性、纤维体积分数和铺层取向因素在结构上的综合表现。首先,由于不同铺层取向而导致层板沿厚度方向每层的变形量不同,继而产生弯矩使结构发生翘曲,具体原因已在铺层取向中阐述;其次,对于厚度较大的层压板,由于复合材料热传导性能较差,在厚度方向存在温度梯度和固化度梯度,也会导致的层压板各部分凝胶时刻不一致继而引

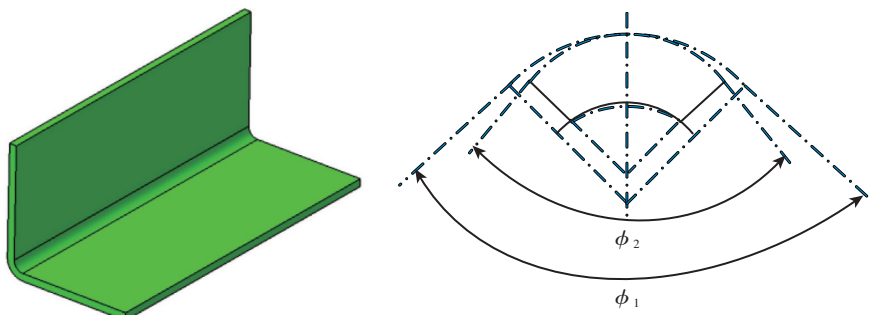


图2 L型结构固化后回弹示意图
Fig.2 Springback on L-shaped structure

起翘曲变形。有部分学者认为薄制件的回弹角度大于厚的制件^[7,9],另一部分学者则认为厚度对回弹并无影响^[3,8],Stephan等^[4]在研究中发现当制件厚度增加一倍,回弹角度增加20%。

1.2 外部因素

1.2.1 固化制度

固化过程中固化温度与环境温度之间存在的温度差会引发回弹变形,且变形量正比于温度差。White^[10]等研究了较低温度下通过延长固化时间或设置3个保温平台的方法可以减小30%的残余应力;而其他文献却发现了相反的结论,Fernlund^[6,11]的研究表明采用两个保温平台(第一个平台温度低于第二个平台温度),树脂在第一个保温平台发生凝胶,制件经过第二个平台固化后其回弹量显著增大。当固化温度恒定时,减少固化时间可减小大致60%的变形,当然减少固化时间会使固化不完全而严重影响之间的力学性能。White同时还研究了降温速率和降温阶段压力的影响,试验中降温速率为0.56℃/min的制件回弹量要比降温速率为5.6℃/min减小12%,White对此现象的解释为降温速率低的制件其粘弹性应力释放更为显著。Fernlund在文献中对固化压力进行了研究,结果表明降温阶段过程中,在0.35~1.0MPa区间内改变热压罐固化压力基本不会影响制件的回弹。

1.2.2 模具

模具对固化变形的影响又可以细分为模具材料性能、模具与制件接触面及模具对固化温度场分布等因素。

由于普通钢模具的线膨胀系数大于复合材料制件,固化过程中,复合材料构件在其贴模面处会与模具产生相互作用。在升温过程中模具与复合材料之间产生剪切应力,模具承受压应力,而构件承受拉应力。模具与构件之间的相互作用从树脂基体进入粘弹性阶段开始,此时复合材料的剪切模量很低,紧贴在模具表面的铺层受到的影响很大,而远离模具的铺层承受的剪切力远小于靠近模具的铺层承受的剪切力,沿构件的厚度方向形成了应力梯度,它随着树脂的固化定型残留在构件中,在构件脱模后释放而使构件变形。对于大型框架式模具,热压罐成型工艺过程中,由于罐内气流分布、框架式模具的自身的导热情况差异等,导致模具型面温度分布不均匀,影响传递到复合材料构件表面的温度及其固化质量。

有研究表明减少制件和工装之间接触面间的相互作用力可以减小回弹角^[12]。该研究还指出Invar钢模具固化成型后的回弹量小于铝模具固化成型后的回弹量。Wiersma等^[8]指出工装材料的热膨胀系数是影响制件

回弹的直接原因,热膨胀系数为25μm/m/℃的模具工装引起的回弹量明显大于热膨胀系数为零的模具。

由上述影响因素可以看出,影响复合材料固化变形的因素众多,且各因素之间存在耦合关系。在实际生产中,某一个因素的改变很可能会产生链式反应,从而导致变形结果的大幅改变,由于目前人们对于复合材料制造成型过程认知有限,对于某些对于某些复杂因素的作用甚至存在完全相反的认识;另外,目前见诸发表的研究文献中,大多数学者集中于针对某一种或几种因素对回弹的影响,忽略了从宏观上针对所有可能影响制件回弹因素进行权重分析。

2 回弹变形仿真模拟

为克服制件固化过程产生的回弹问题,传统的方法是在经验和工艺试验的基础上,针对具体的结构,从外因的角度,对结构件的固化工艺所用模具型面进行反复的调整和补偿性修正加工,以控制变形程度或抵消变形的影响作用,这种处理方法是基于经验和大量的试验数据为基础的,必然要耗费大量的人力物力和时间,且结果缺乏普适性,不能适应目前的设计制造要求。随着复合材料结构件在航空领域的大量应用,找到复合材料固化变形主控因素,建立回弹变形预测方法成为航空复合材料结构的低成本和自动化制造的发展方向。

针对影响回弹的主要因素,Radford^[13]等提出了回弹计算公式(1),公式中考虑了热变形($\Delta\theta_{CTE}$)及复合材料固化收缩($\Delta\theta_{CS}$)对回弹的共同作用。Rennick和Huang等^[5,14]分别在自己的研究中应用了公式(1)作为回弹计算公式并取得了较为准确的结果,但该公式并未考虑模具等外部因素影响仅限于外形简单的几何制件回弹预测。

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{CTE} + \Delta\theta_{CS} = \theta \left(\frac{(\alpha_l - \alpha_r)\Delta T}{1 + \alpha_r\Delta T} \right) + \theta \left(\frac{\phi_l - \phi_r}{1 + \phi_r} \right) \quad (1)$$

Gasick和Renieri^[15]使用二维平面应力单元对于简单Z型及帽型加筋结构进行了模拟和计算,其计算结果与实际误差在20%左右。研究在之后的分析中指出,由于没有考虑固化收缩和降温过程中热膨胀系数的变化,以及没有使用三维实体单元等因素使得计算结果损失了部分精度。Jain和Mai^[16]对圆柱形及壳类等单曲率复合材料构件固化成型过程中的残余应力进行了理论分析,基于固化工艺温度差及固化收缩等因素给造成的收缩应力建立了薄壳类制件残余应力本构模型,该模型经不同铺层顺序、固化温度、几何构型及工装R角等情况试验数据验证。但由于模型中忽略了面外应变且对于固化收缩应变采用了试验测定的等效替代方法,该模型的应用范围十分有限。Padovec等^[17]通过对固

化过程中温度、湿度及体积变化的研究建立了预测对称铺层层板回弹的计算公式并得到试验验证。Fernlund^[11]通过复合材料制造工艺模拟软件 COMPRO 研究了成型模具、工艺制度对 C 型梁结构回弹的影响,模拟结果表明设置两个保温平台后 C 型梁的回弹量明显增大,该模型预测的回弹趋势与试验一致但预测值与试验结果相差 20%。

在国内,党嘉立^[18]对复合材料角型材结构的结构固化变形进行了研究,通过前人对碳/环氧复合材料 L 型材的实验数据拟合公式得到该构型角材回弹角约为 0.7°,但研究并没有直接证明其回弹预测的正确性。戴棣、乔新等^[19]在经典层合理论基础上用等效自由固化应变表征板在无外部约束状态下因化学收缩和热胀冷缩效应导致的宏观变形。戴福红、任立波等人^[20-22]运用里兹法研究了复合材料层合薄壳结构的固化变形。模型中考虑化学收缩作用、固化周期、铺层厚度比、长宽比等对非对称复合材料层板固化变形的影响。模型中考虑应用了几何非线性并探讨了不同铺层顺序对固化形状的影响,理论和实验结果吻合较好。但作者同时指出,该部分工作仅属于探索性,尚有大量的力学问题需进一步深入研究。寇哲君等^[23]以共固化加筋壁板为例建立了三维模型分析了固化变形位移场并说明了回弹变形及几何设计参数之间的关系。李君等^[24]对复合材料 T 型整体化结构固化成型的工艺过程进行研究,建立了结构变形预测模型,运用有限单元方法计算了整体结构件由于固化反应引起的体积收缩和材料热膨胀系数不一致而导致的翘曲变形量,并研究了结构变形与其尺寸之间的关系。张继奎、郇正能等^[25]采用整体-子模块化方法,建立了三维有限元模型来描述复合材料固化全过程,研究以 L 型结构为例,分析了结构设计、固化工艺和成型模具等因素对固化变形的影响方式和程度,研究指出升温速率和对流换热系数通过改变峰值温度影响回弹角,固化压力通过改变树脂分布和含量影响回弹角;模具形式通过改变树脂分布梯度和模具对结构的作用力位置影响回弹角。

从上述文献中可知,回弹的数值模拟研究从解析法到有限元分析,复杂程度逐渐上升,所考虑的影响因素逐渐增多。然而大部分学者对于制件回弹的研究对象主要是 L 型、T 型、U 型等几何结构相对规则或简单的复合材料构件,距离应用于具有复杂几何曲面的大型复合材料构件回弹预测尚有一定的差距。

3 展望

复合材料构件在热压罐成型过程中产生的回弹变形,是造成其成型精度低下和质量不稳定的主要原因,

如何提高复合材料构件的成型精度是众多学者长期以来研究的热点。随着复合材料用量比重的增大以及低成本制造要求的提出和整体化程度的日益提高,深入研究回弹变形机理,确定回弹影响主控因素,采用数值模拟方法建立适用于大尺寸制件热压罐成型变形的可靠预测方法将是缩短研制周期,降低生产成本,实现复合材料结构的整体化和设计制造一体化进程的必由之路。

参考文献

- [1] Radford D W. Cure shrinkage induced warpage in flat uni-axial composites. *Journal of composites technology & research*, 1993, 15(4):290-296.
- [2] Yang S Y, Huang C K. Curvature predictions of flat advanced composite tools based on measured volume fraction gradient. *Journal of advanced materials*, 1997, 28(2):47-55.
- [3] Patterson J M, Springer G S, Kollar L P. Experimental observations of the spring-in phenomenon. *Proceedings of the 8th International Conference on Composite Materials*, 1991:10-D-1-10-D-8.
- [4] Stephen A, Schwinge E, Muller J, et al. On the springback effect of CFRP stringers: an experimental, analytical and numerical analysis. *Proceedings of the 28th International SAMPE Technical Conference*, Seattle:1996.
- [5] Rennie T, Radford D W. Components of manufacturing distortion in carbon fiber/epoxy angle brackets. *Proceedings of the 28th international SAMPE Technical Conference*, Seattle, 1996:189-97.
- [6] Fernlund G, Rahman N, Courdji R, et al. Experimental and numerical study of the effect of cure cycle, tool surface, geometry, and the lay-up on the dimensional stability of autoclave-processed composite parts. *Composites Part A: Manufacturing*, Seattle, 2002, 13(3):341-51.
- [7] Kim C G, Kim T W, Kim I G, et al. Spring-in deformation of composite laminated bends. *Proceedings of the 7th international conference on composite materials (ICCM7)*, Beijing, 1989:83-88.
- [8] Wiersma H W, Peeters J B, Akkerman R. Prediction of spring-forward in continuous-fibre/polymer L shaped parts. *Composites Part A*, 1998, 29A(11):1333-1342.
- [9] Radford D W, Rennie T. Separating sources of manufacturing distortion in laminated composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2000, 19(8): 621-641.
- [10] White S R, Hahn H T. Cure cycle optimization for the reduction of processing-induced residual stresses in composite materials. *Journal of Composite Materials*, 1993, 27(14):1352-1378.
- [11] Fernlund G, Poursartip A. The effect of tooling material, cure cycle, and tool surface finish on spring-in of autoclave processed curved composite parts. *Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials (ICCM12)*, 1999.
- [12] Jognston A, Hubert P, Fernlund G, et al. Poursartip A. Process modeling of composite structures employing a virtual autoclave concept. *Science and Engineering of Composite Materials*, 1996, 5(3-4): 235-252.

(下转第 110 页)



图2 面压试验压痕图

Fig.2 Indentation figure of face pressure test

行泄漏量的检测。具体步骤为:(1)将产品采用扭矩为24NM 固定 在气密性检测仪治具上;(2)充 0.5bar 的压力,保持 1min ;(3)观察仪表显示的泄漏量,确定是否满



图3 气密性现场检测

Fig.3 Field testing of tightness



图4 气密性检测结果显示

Fig.4 Tightness test result

足使用要求;(4)记录泄漏量,取出产品。现场检测照片如图 3、图 4 所示。

经现场检测,泄漏量为 1.21mL/min,满足泄漏量小于 6mL/min 的要求。该密封圈符合预期使用要求。

5 结论

密封材料的选择及密封结构设计对密封圈密封性能的好坏影响较大。应充分考虑密封圈的使用工况环境来进行恰当的选择和设计。为证明其可靠性还应进行相应的 Fuji 纸面压试验、气密性检测等,才能确保密封圈的密封性能满足要求。

参考文献

[1] 密封技术基础知识. 2011-04-07[2013-12-09]. <http://www.cbee.cn/info/detail/71-123898.html>.

(责编 日午)

(上接第 107 页)

[13] Radford D W, Diefendorf R J. Shape instabilities in composites resulting from laminate anisotropy. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1993, 12: 58-75.

[14] Huang C K, Yang S Y. Short communication-warping in advanced composite tools with varying angles and radii. *Composites Part A*, 1997, 28A: 891-893.

[15] Gasick M F, Renieri G D. Analysis techniques for the prediction of springback in formed and bonded composite components. N95-28289 McDonnell Aircraft Company, 1995: 1539-1558.

[16] Jain L K, Mai Y W, Stresses and deformations induced during manufacturing.Part I. *Journal of Composite Materials*, 1997, 31:672-695.

[17] Padovec Z, Růžička M, Chlup H, et al. Springforward phenomenon on angular sections of composite materials-analytical. Numerical and Experimental Approach. *Bulletin of Applied Mechanics*, 2011, 7(26): 31-36.

[18] 党嘉立. 复合材料角型材结构固化变形研究. *宇航材料工艺*, 1993, 5:10-12.

[19] Dai D, Qiao X, Liu S G. Calculations of cure deformation of single-curved composite laminates. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1999, 5: 46-58.

[20] 戴福洪,张博明,杜善义. 复合材料非对称正交薄层板的固化变形. *复合材料学报*, 2006, 23(4):164-168.

[21] 任立波,罗小东,崔德刚. 复合材料非对称正交层合薄壳固化变形研究. *航空学报*, 2006, 17(7):128-130.

[22] 戴福宏,张博明,杜善义. 非对称复合材料薄层板固化变形及其应用. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(1):58-60.

[23] 寇哲君,戴棣,曹正华. 复合材料结构固化变形预测. *材料工程*, 2007 (增 1):225-228.

[24] 李君,姚学锋,刘应华,等. 复合材料 T 型整体化结构固化翘曲变形模拟. *复合材料学报*, 2009, 26(1):156-161.

[25] 张继奎,郦正能,关志东,等. 热固性复合材料固化过程三维有限元模拟和变形预测. *复合材料学报*, 2009, 26(1):174-178.

(责编 小城)